

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL,  
INFORMÁTICA Y DE TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA**

**TRABAJO FIN DE MASTER  
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO  
A TORSIÓN DE TUBOS REDONDOS  
REALIZADOS MEDIANTE  
FABRICACIÓN ADITIVA TIPO FDM**



**MASTER EN INGENIERIA DE MATERIALES Y FABRICACIÓN**

---

Autor: Alejandro Salvador Rodríguez

Directores: Carlos Berlanga Labari y Javier López Martínez

Pamplona, noviembre de 2020

# **Agradecimientos**

**Quiero agradecer a mis padres todo el apoyo recibido para llegar hasta donde he llegado, su incansable energía dedicada al cien por cien a sus hijos para crear una familia en la que nunca nos faltase nada para estudiar y conseguir lo que nos propusiéramos.**

**A mis hermanos y hermanas por aconsejarme siempre en todos los aspectos de la vida, y dar energía y apoyo en aquello que me ha influenciado para ser mejor persona.**

**A mi novia por dar apoyo, cariño y comprensión en los momentos difíciles para compaginar todos los objetivos que nos hemos propuesto en nuestra vida.**

**A mis profesores por su dedicación y esfuerzo en estos momentos difíciles de cara a adaptarnos a una nueva realidad en la que el conocimiento es vital para evolucionar en la sociedad y prosperar.**

**A mis amigos y seres queridos, por los buenos y malos momentos vividos que nos han unido más aún.**



## ÍNDICE

<b>ÍNDICE .....</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>5</b>
<b>RESUMEN/ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE PALABRAS CLAVE .....</b>	<b>6</b>
<b>1.    MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>7</b>
<b>2.    ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES .....</b>	<b>8</b>
<b>3.    MATERIAL Y METODOS .....</b>	<b>11</b>
3.1.    EQUIPOS DE TRABAJO.....	11
3.1.1. <i>Equipo multifunción automático H5KS.....</i>	11
3.1.2. <i>Equipo de ensayo a flexión - torsión WP-130 .....</i>	11
3.1.3. <i>Reloj comparador digital DIGICO 11.....</i>	12
3.1.4. <i>Cronómetro CASIO 2699 HS-3V-1R.....</i>	12
3.1.5. <i>Impresora 3D FDM Prusa i3 MK3s.....</i>	13
3.1.6. <i>Software de diseño, fabricación de piezas y análisis FEM.....</i>	13
3.2.    CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL .....	14
3.2.1. <i>Ensayo a tracción .....</i>	15
3.3.    COMPORTAMIENTO A TORSIÓN DE TUBOS HUECOS DE PEQUEÑO ESPESOR .....	18
3.3.1. <i>Ensayo a torsión en equipo WP130 .....</i>	19
3.3.2. <i>Simulación a torsión mediante análisis FEM .....</i>	21
<b>4.    RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>23</b>
4.1.    CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL .....	23
4.2.    ENSAYO A TORSIÓN .....	26
4.3.    ANÁLISIS FEM.....	29
4.4.    LIMITACIONES DEL TRABAJO .....	33
<b>5.    CONCLUSIONES .....</b>	<b>36</b>
<b>6.    TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>37</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>38</b>

## ÍNDICE

### ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. EQUIPO H5KS DE LA MARCA TINIUS OLSEN .....	11
ILUSTRACIÓN 2. EQUIPO WP-130 DE LA MARCA GUNT HAMBURG .....	12
ILUSTRACIÓN 3. RELOJ COMPARADOR DIGITAL DIGICO 11 DE LA MARCA TESA .....	12
ILUSTRACIÓN 4. CRONÓMETRO CASIO 2699 HS-3V-1R .....	13
ILUSTRACIÓN 5. IMPRESORA 3D FDM PRUSA I3 MK3s .....	13
ILUSTRACIÓN 6. PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS DEL MATERIAL SEGÚN FICHA TÉCNICA [16] .....	15
ILUSTRACIÓN 7. GEOMETRÍA PROBETA 1BA PARA ENSAYO A TRACCIÓN SEGÚN NORMA ISO 527-2:2012 .....	16
ILUSTRACIÓN 8. PROBETAS EN “HORIZONTAL” EN PRUSA SLICER (IZQ.) Y RESULTADO FINAL (DCHA.) .....	16
ILUSTRACIÓN 9. PROBETAS EN “VERTICAL_X,Y-AXIS” EN PRUSA SLICER (IZQ.) Y RESULTADO FINAL (DCHA.) .....	17
ILUSTRACIÓN 10. PROBETAS EN “VERTICAL_Z-AXIS” EN PRUSA SLICER (IZQ.) Y RESULTADO FINAL (DCHA.) .....	17
ILUSTRACIÓN 11. PROBETA PREPARADA PARA ENSAYO A TRACCIÓN .....	18
ILUSTRACIÓN 12. VISTA 3D Y ALÁMBRICA DE LA PROBETA HUECA PARA ENSAYO A TORSIÓN EN EQUIPO MANUAL .....	19
ILUSTRACIÓN 13. VISTA DE ALZADO Y PERFIL DE PROBETA HUECA PARA ENSAYO A TORSIÓN EN EQUIPO MANUAL .....	19
ILUSTRACIÓN 14. PROBETAS EN “VERTICAL_Z-AXIS” EN PRUSA SLICER (IZQ.) Y RESULTADO INTERMEDIO (DCHA.) .....	20
ILUSTRACIÓN 15. EQUIPO DE ENSAYO WP130 PREPARADO (IZQ.) Y DETALLE DE MORDAZA Y PROBETA (DCHA.) .....	20
ILUSTRACIÓN 16. EQUIPO DE ENSAYO WP130 CON PROBETA MACIZA SIN CARGA (IZQ.) Y CARGA MÁXIMA (DCHA.) .....	21
ILUSTRACIÓN 17. VISTA 3D TRANSLÚCIDA DE PROBETA 1 MM DE GROSOR CON LÍNEAS DIVISORIAS .....	22
ILUSTRACIÓN 18. CONDICIONES DE CONTORNO EN EL SÓLIDO MALLADO .....	22
ILUSTRACIÓN 19. CURVAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN PARA CADA CONFIGURACIÓN .....	23
ILUSTRACIÓN 20. FRACTURAS PROBETA 8 DE “VERTICAL_Z-AXIS”, “VERTICAL_X,Y-AXIS” Y “HORIZONTAL” .....	23
ILUSTRACIÓN 21. MEDIA DE CURVAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN EN REGIÓN ELÁSTICA PARA CADA CONFIGURACIÓN .....	24
ILUSTRACIÓN 22. CURVAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN PARA CADA CONFIGURACIÓN. LÍMITES ELÁSTICOS .....	24
ILUSTRACIÓN 23. CURVAS PAR TORSOR / GIRO. PROBETA MACIZA .....	27
ILUSTRACIÓN 24. CURVAS PAR TORSOR / GIRO. PROBETA 3 MM ESPESOR PARED .....	27
ILUSTRACIÓN 25. CURVAS PAR TORSOR / GIRO. PROBETA 2 MM ESPESOR PARED .....	28
ILUSTRACIÓN 26. CURVAS PAR TORSOR / GIRO. PROBETA 1 MM ESPESOR PARED .....	28
ILUSTRACIÓN 27. RECTAS PAR TORSOR / GIRO. SIMULACIÓN FEM .....	30
ILUSTRACIÓN 28. CURVAS PAR TORSOR / GIRO. PROBETA MACIZA (FEM Y EXPERIMENTAL) .....	30
ILUSTRACIÓN 29. CURVAS PAR TORSOR / GIRO. PROBETA 3 MM GROSOR DE PARED (FEM Y EXPERIMENTAL) .....	31
ILUSTRACIÓN 30. CURVAS PAR TORSOR / GIRO. PROBETA 2 MM GROSOR DE PARED (FEM Y EXPERIMENTAL) .....	31
ILUSTRACIÓN 31. CURVAS PAR TORSOR / GIRO. PROBETA 1 MM GROSOR DE PARED (FEM Y EXPERIMENTAL) .....	32
ILUSTRACIÓN 32. SEMIESPIRA HUECA DE SECCIÓN CUADRADA SOMETIDA A TORSIÓN EN LA MÁQUINA DE TRACCIÓN .....	34

ILUSTRACIÓN 33. SEMIESPIRA DE SECCIÓN CUADRADA. FRACTURA SEMIESPIRA HUECA (ARRIBA) Y MACIZA (ABAJO) .....	35
ILUSTRACIÓN 34. DETALLE DE FRACTURA A 45º EN LA SEMIESPIRA HUECA DE SECCIÓN CUADRADA.....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS DEL MATERIAL SEGÚN FICHA TÉCNICA [16] .....	14
TABLA 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE PROBETAS IMPRESAS EN 3D SEGÚN FICHA TÉCNICA <sup>(4)</sup> [16].....	15
TABLA 3. SECUENCIA DE CARGA PARA EL ENSAYO A TORSIÓN .....	21
TABLA 4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE PROBETAS IMPRESAS EN 3D SEGÚN FICHA TÉCNICA <sup>(4)</sup> .....	25
TABLA 5. TABLA DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL MATERIAL PARA EL ENSAYO ESTÁTICO .....	29
TABLA 6. SIMULACIÓN ÁNGULO GIRADO EN CADA PROBETA PARA EL MOMENTO TORSOR MÁXIMO .....	29
TABLA 7. RESUMEN Y COMPARATIVA RIGIDEZ FEM Y ENSAYOS SEGÚN TIPO DE PROBETA .....	32

## **RESUMEN/ABSTRACT**

---

El PLA es un material muy conocido en el sector de la impresión 3D. Se caracteriza por tener muy buena relación calidad/precio frente a otros materiales más costosos, ofreciendo unas propiedades mecánicas muy buenas en condiciones ambientales y sin exposición a luz solar o agentes químicos. Se ha caracterizado el material seleccionado mediante ensayos a tracción según normativa ISO para obtener las propiedades de interés. Las probetas ensayadas durante el presente estudio se han fabricado mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM en inglés) y siguiendo recomendaciones del fabricante.

Se ha realizado el diseño y fabricación de tubos redondos huecos de diferente espesor de pared para analizar el comportamiento a torsión en función del espesor de pared.

Una vez analizado el comportamiento experimental, se ha aplicado la metodología de elementos finitos en aras de obtener un modelo que nos ayude a predecir y simular la respuesta de estas piezas fabricadas y ensayadas bajo unas condiciones y parámetros definidos.

Las conclusiones obtenidas se consideran de interés ya que se puede conseguir ahorrar material y tiempo sin que apenas afecte a la rigidez, o conseguir importantes ahorros de material y tiempo a costa de reducir la rigidez. El modelo por elementos finitos ayuda a predecir el comportamiento a torsión de tubos redondos huecos de diferente espesor de pared cuando van a trabajar en la región elástica, una vez que tenemos caracterizado el material.

## **LISTA DE PALABRAS CLAVE**

---

- Fabricación Aditiva / Additive Manufacturing
- Modelado por Deposición Fundida / Fused Deposition Modeling
- Método de Elementos Finitos / Finite Elements Method
- Torsión / Torsion
- Ácido Poliláctico / Polylactic Acid

## 1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

---

La decisión de comenzar los estudios en el Máster de Ingeniería de Materiales y Fabricación fue tomada después de analizar qué complemento necesitaba para mi formación. La ingeniería mecánica supuso una base firme para entender el comportamiento de los materiales en estático y en dinámico, pero no profundizaba en comprender aspectos muy importantes como la superficie de los materiales, el análisis de la microestructura de los materiales mediante diferentes métodos, aporte de elementos químicos al material para obtener un determinado resultado, la interacción de los materiales con agentes externos, analizar en detalle por qué suceden las fallas de los materiales cuando están en servicio y bien diseñados, proveedores y costes para los principales bloques de materiales (metales, polímeros, cerámicos y materiales compuestos), etc., todo ello unido a un enfoque práctico y funcional para la industria vanguardista que existe hoy día.

Durante los estudios de este Máster decidí adquirir mi primer equipo de fabricación aditiva de modelado por deposición fundida, dada la extensa comunidad que existe hoy en día y que permanece en continua investigación y desarrollo de nuevas funcionalidades y ajustes para lograr mejores acabados y resultados.

Si bien existen trabajos de investigación sobre el comportamiento a tracción y flexión de probetas fabricadas mediante impresión 3D de tipo FDM, no existe demasiada literatura sobre el comportamiento a torsión de probetas huecas impresas mediante tecnología FDM.

Por ello surge la motivación de finalizar los estudios de este Máster realizando una búsqueda de información sobre probetas huecas sometidas a torsión, y poder aportar resultados que ayuden a la comunidad científica.

El objetivo del trabajo es el estudio del comportamiento a torsión de tubos huecos fabricados mediante modelado por deposición fundida.



Los objetivos específicos del trabajo son:

- Estudiar la rigidez y resistencia a torsión de tubos circulares huecos para distintos parámetros de impresión.
- Estudiar la rigidez y resistencia a torsión de tubos circulares huecos por método de elementos finitos.

## **2. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES**

---

El campo de la fabricación aditiva suscita gran interés. Varios estudios demuestran que esta tecnología de fabricación acentúa el comportamiento anisotrópico del material, debido en gran medida a la cantidad de variables que entran en juego en este proceso y a las limitaciones que existen para controlar éstas. M. Samykano et al., [1] estudia el comportamiento de probetas de ABS impresas mediante tecnología de modelado por deposición de material fundido (Fused Deposition Modeling en inglés, FDM), obteniendo unos parámetros óptimos para el mejor desempeño mecánico.

Miquel Domingo-Espín et al. [2] experimenta a torsión y flexión una probeta que caracteriza según la orientación de la impresión sobre los ejes de la máquina y el ángulo de relleno y perímetros. Posteriormente contrasta con los resultados de un modelo de elementos finitos. Esta investigación simplifica el problema considerando un material isótropo dentro de la región elástica y el modelo por elementos finitos como un sólido que no presenta porosidad ni unión entre hilos y capas. Concluye que dentro de la región elástica se podría predecir el comportamiento, no obstante, recomienda tener en cuenta la anisotropía de las piezas impresas mediante FDM dada la cantidad de variables que pueden afectar al resultado.

Rui Zou et al. [3] analiza en profundidad este comportamiento analizando los ensayos previos que ya existen, entre ellos los realizados por Es-Said et al. [4], ensayos a tracción, flexión e impacto de probetas con diferente ángulo de relleno. Ziemian et al. [5] además de tracción e impacto analiza el comportamiento en compresión y a cargas cíclicas. Dawoud et al. [6] además de

estudiar la tracción, flexión e impacto, analiza la precisión dimensional incluyendo como parámetro la altura de capa. Es interesante el estudio de Dawoud et al. [6] pues compara probetas fabricadas por inyección y por fabricación aditiva (FDM), llegando a la conclusión de que el rendimiento mecánico siempre será inferior en la fabricación aditiva, siendo el más cercano el comportamiento observado con 0,05 mm de altura de capa (debido a la mayor compactación de material y menor porosidad). Además, concluye que con esta altura de capa la orientación del relleno no es relevante en el comportamiento mecánico.

Balderrama et al. [7] centra su estudio en el análisis a torsión y el comportamiento anisotrópico de probetas impresas mediante FDM. Balderrama et al. [7] compara este comportamiento con probetas fabricadas por inyección y concluye que no hay prácticamente diferencia entre los dos tipos de fabricación dentro del estado elástico del material. Hay una notable diferencia en la deformación producida cuando sucede la fractura. Esto parece indicar que la compactación del material cuando es fabricado por inyección aporta mayor ductilidad frente a una probeta fabricada mediante impresión 3D de tipo FDM. En este caso se estudia una probeta de sección rectangular de dimensiones 0,7 x 1,4 x 8 cm. Balderrama analiza el módulo cortante, esfuerzo último de rotura, deformación última de rotura y cortante al 0,2% de deformación por separado según el ángulo del relleno, teniendo resultados muy dispares. Finalmente, mediante un modelo de optimización factorial concluye que la probeta con orientación YXZ y ángulo de relleno 0° es la que mejor comportamiento da en todas las magnitudes medidas anteriormente.

Enea Sacco [8] asume desde un principio que el material que se obtiene mediante esta tecnología de fabricación es anisótropo y por lo tanto no contempla simplificar el problema, de hecho, considera la pieza que se obtiene mediante impresión FDM un composite formado por el interior o relleno, por un lado, y el perímetro o contorno por otro lado. Enea Sacco en primer lugar caracteriza el material obteniendo de forma experimental módulos elásticos y

deformaciones en cada eje. Estudia el comportamiento de resortes según patrón de relleno y geometrías del resorte, así como altura de capa, siendo la altura de capa la que mayor diferencia aporta en comportamiento como ya advierten otros autores. Respecto al patrón de relleno, con el relleno mono direccional consigue mayor esfuerzo último de rotura y mayor deformación última de rotura.

Enea Sacco [8] además somete al resorte a cargas cíclicas y concluye que para cargas cíclicas la rigidez no se ve afectada cambiando los parámetros, pero sí que aprecia los efectos de “creep” o viscoelasticidad debido a las características del PLA. Esto supone una pequeña deformación que se va acumulando progresivamente con el paso del tiempo y al estar sometido a carga.

M. Berzal et al. [9] estudia el comportamiento a torsión de probetas impresas mediante tecnología FDM considerando el material isotrópico y distintos patrones de relleno para contrastarlo con un modelo por elementos finitos. Aquí estudian una probeta semi-hueca al presentar relleno al 40% rectilíneo, siendo cada capa contigua girada 90° con respecto a la anterior. Queda por tanto el 60% de la probeta hueca, salvo las bases superior e inferior, que quedan completamente rellenas. Diseñan tres modelos diferentes para análisis FEM y ensayan hasta 9 filamentos diferentes para terminar eligiendo tres filamentos con los que fabricar las probetas y contrastar resultados con los análisis FEM, siendo el modelo semi-hueco el que más se acerca a los resultados experimentales, y en mayor medida en la región elástica.

Resulta interesante diseñar geometrías para piezas impresas mediante tecnología FDM, dada la libertad existente en el diseño y posibilidad de geometrías complejas [8], ya que no requiere demasiada inversión y las opciones son amplias de cara a optimizar gasto de material frente a propiedades mecánicas, conociendo los experimentos que ya han realizado otros investigadores.

### 3. MATERIAL Y METODOS

---

#### 3.1. EQUIPOS DE TRABAJO

##### 3.1.1. Equipo multifunción automático H5KS

Este equipo se utilizará para los ensayos de tracción. Dispone de lectura automática de fuerza, desplazamiento y tiempo. Tiene una célula de carga de 5 kN y un rango de velocidad de 0,001 mm/min a 1500 mm/min para cargas de hasta 1 kN.



Ilustración 1. Equipo H5KS de la marca Tinius Olsen

Para más información, consultar ficha técnica [18] en el apartado Bibliografía y Referencias.

##### 3.1.2. Equipo de ensayo a flexión - torsión WP-130

Este equipo se utilizará para los ensayos de torsión. Dispone de un plato graduado con los puntos donde aplicar la carga para someter a flexión, torsión, o combinación de ambas (los puntos están en ángulos de 15° respecto al centro de la probeta).

Las mordazas de sujeción de la probeta sujetan hasta 15 mm de altura del extremo de la probeta cilíndrica.

El desplazamiento vertical máximo que puede realizar el plato en sus puntos de medición y aplicación de carga colocados a 10 cm del centro de la probeta es de 10 mm.

Para la lectura de este desplazamiento vertical utilizaremos un reloj comparador digital y será colocado justo en el otro extremo del punto en donde se aplica la carga.



Ilustración 2. Equipo WP-130 de la marca Gunt Hamburg

Para más información, consultar ficha técnica [19] en el apartado Bibliografía y Referencias.

### 3.1.3. Reloj comparador digital DIGICO 11

Este equipo se utilizará para la lectura del desplazamiento vertical de los ensayos en el equipo de flexión – torsión. La lectura máxima que permite es de 12,5 mm por lo que es suficiente para nuestros ensayos.



Ilustración 3. Reloj comparador digital DIGICO 11 de la marca TESA

Para más información, el modelo/tipo es 019.30104, consultar ficha técnica [20] en el apartado Bibliografía y Referencias.

### 3.1.4. Cronómetro CASIO 2699 HS-3V-1R

Utilizaremos este cronómetro para medir el tiempo en los ciclos de carga y descarga para los ensayos a torsión. Para más información consultar especificaciones técnicas [21] en el apartado Bibliografía y Referencias.



Ilustración 4. Cronómetro CASIO 2699 HS-3V-1R

### 3.1.5. Impresora 3D FDM Prusa i3 MK3s

Este equipo se utilizará para la impresión de las distintas probetas que necesitaremos a lo largo de la investigación. Entre sus características principales, puede imprimir hasta una velocidad máxima de 200 mm/s y el volumen de impresión es de 250 x 210 x 210 mm (XYZ). Es la misma impresora que utiliza Enea Sacco [8] para imprimir probetas de PLA.



Ilustración 5. Impresora 3D FDM Prusa i3 MK3s

Para más información consultar especificaciones técnicas [22] en el apartado Bibliografía y Referencias.

### 3.1.6. Software de diseño, fabricación de piezas y análisis FEM

Se ha utilizado el siguiente software:

- Prusa Slicer (laminador de Prusa). Programa específico que convierte archivos .STL (STereoLitography) a lenguaje máquina .GCODE. Para ello, el archivo mallado es fabricado siguiendo los parámetros deseados, trazando la ruta más óptima en cuanto a acabado y eficiencia (evitando tiempos muertos de movimientos sin adición de material).

- Autodesk Fusion 360 (Licencia Educativa). Programa de diseño CAD para generar el archivo .STL mencionado anteriormente.
- SolidWorks 2019 (Licencia de prueba). Programa de diseño CAD y análisis FEM. Utilizaremos este programa para el diseño de probetas y ensayo mediante análisis FEM.

Para más información, consultar Bibliografía y Referencias [23], [24], [25].

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

En primer lugar, debemos conocer las características mecánicas del material con el que vamos a trabajar. Se ha elegido como material el Ácido Poliláctico [26] (PLA) de color amarillo, del mismo fabricante de la máquina de impresión 3D (PRUSA). Los motivos que han llevado a elegir este material son:

- Facilidad de impresión
- Material con buenas propiedades mecánicas y bajo coste
- Material con ficha técnica y testado según normas ISO
- El material reúne los requisitos necesarios para lograr alcanzar los objetivos del presente estudio

Propiedades físicas	Valor típico	Método
Temperatura máxima de fusión [°C]	145-160	ISO 11357
Temperatura de transición vítrea [°C]	55-60	ISO 11357
Índice de fluidez en masa MFR [g/10min] <sup>(1)</sup>	10,4	ISO 1133
Índice de fluidez en volumen MVR [cm <sup>3</sup> /10min] <sup>(1)</sup>	9,4	ISO 1133
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	1,24	ISO 1183
Absorción de humedad en 24 horas [%] <sup>(2)</sup>	0,3	PrusaPolymers
Absorción de humedad en 7 días [%] <sup>(2)</sup>	0,3	PrusaPolymers
Absorción de humedad en 4 semanas [%] <sup>(2)</sup>	0,3	PrusaPolymers
Temperatura de deflexión térmica (0,45 MPa) [°C]	55	ISO 75
Límite elástico del filamento [MPa]	57,4±0,4	ISO 527-1

<sup>(1)</sup> 2,16 kg; 210 °C | <sup>(2)</sup> 28 °C; H.R. 37 %

Tabla 1. Propiedades físicas típicas del material según ficha técnica [16]

Propiedades / Dirección de impresión	Horizontal	Vertical X,Y-Axis	Vertical Z-Axis	Método
Módulo de Young [GPa]	2,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	ISO 527-1
Límite elástico [MPa]	50,8 ± 2,4	59,3 ± 1,9	37,6 ± 4,0	ISO 527-1
Deformación en límite elástico [%]	2,9 ± 0,3	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3	ISO 527-1
Resistencia a impacto Charpy <sup>(3)</sup> [kJ/m <sup>2</sup> ]	12,7 ± 0,7	13,7 ± 0,7	5,0 ± 1,4	ISO 179-1

Tabla 2. Propiedades mecánicas de probetas impresas en 3D según ficha técnica <sup>(4)</sup> [16]

<sup>(3)</sup> Charpy sin muescas, dirección lateral del golpe según ISO 179-1 | <sup>(4)</sup> Impresora 3D Original Prusa i3 MK3 ha sido la máquina utilizada para fabricar las probetas. Laminador Prusa Edición 1.40.0 es el software utilizado para crear los códigos G (Código máquina) con la siguiente configuración: **Filamento Prusa PLA; Configuración de impresión 0,20 mm RÁPIDO (capas de 0,2 mm de altura); Capas sólidas en base superior: 0 En base inferior: 0; Relleno: 100%; Relleno rectilíneo; Velocidad de impresión 200mm/s; Temperatura del extrusor: 215°C (en todas las capas); Temperatura de la cama caliente: 60°C (en todas las capas); El resto de parámetros se dejan con la configuración por defecto.**

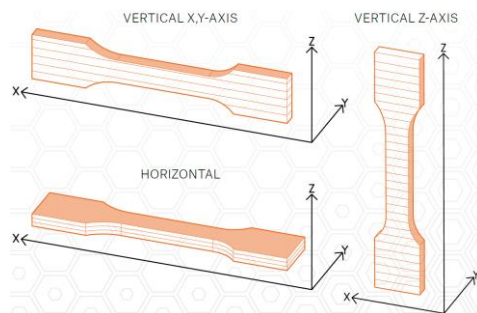


Ilustración 6. Propiedades físicas típicas del material según ficha técnica [16]

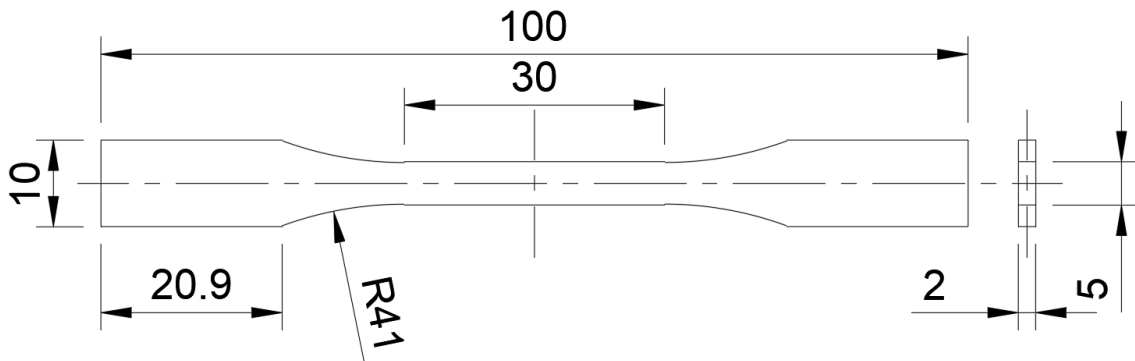
Seleccionado el material, conocemos sus valores teóricos según ficha técnica. Debemos verificar que el material cumple con los valores aportados por el fabricante, para ello debemos realizar ensayos a tracción en las mismas condiciones en las que fueron realizados los aportados por la ficha técnica (descritas anteriormente). Se tendrán en cuenta estos resultados de cara a posteriores cálculos.

### 3.2.1. Ensayo a tracción

Se deben imprimir 5 probetas según norma ISO 527-2:2012 [10], modelo de probeta 1BA (probeta de menor tamaño) y en las tres orientaciones aportadas por el fabricante del filamento, utilizando los mismos parámetros de impresión.



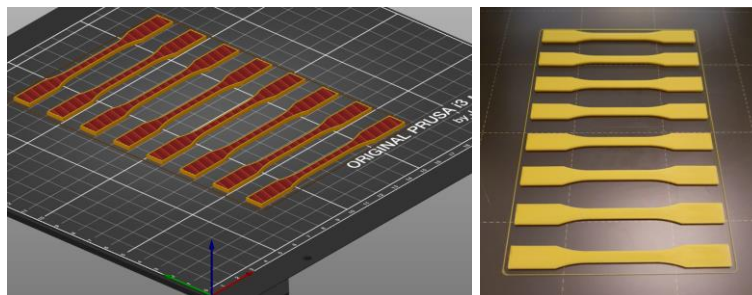
Primero debemos realizar el diseño de la probeta 1BA utilizando el software CAD Autodesk Fusion 360 (versión educativa) y siguiendo las indicaciones de la norma ISO 527-2:2012.



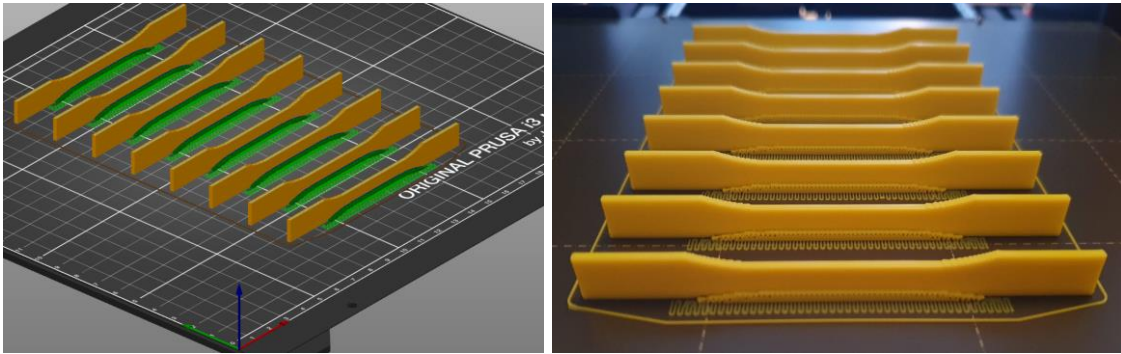
**Ilustración 7. Geometría probeta 1BA para ensayo a tracción según norma ISO 527-2:2012**

Resuelta la geometría, exportamos el diseño como archivo .STL (STereoLitography) y lo importamos en el software de laminación Prusa Slicer. Una vez laminado exportamos el código máquina como archivo .GCODE, archivo que será leído por el equipo de impresión 3D FDM Prusa i3 MK3s y donde finalmente obtendremos nuestras probetas terminadas.

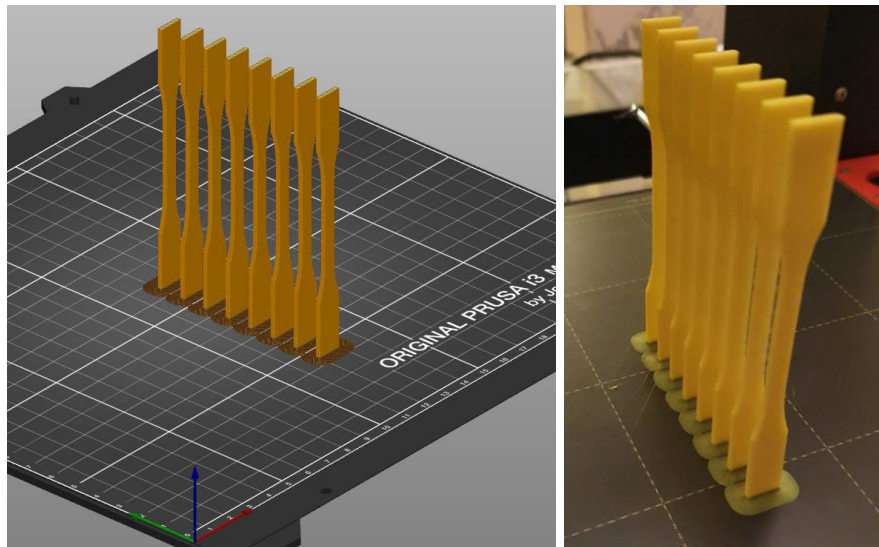
Procedemos a imprimir 8 probetas en cada disposición, de esta forma mitigamos posibles variaciones en la fabricación en caso de que una probeta sea defectuosa y sea necesario fabricar otra, quedando las 8 probetas fabricadas en las mismas condiciones y en el mismo lote de producción. La media de los parámetros de interés se calculará como mínimo de 5 probetas, descartando los resultados de mayor dispersión frente al valor medio para tener la menor desviación típica y un resultado más preciso.



**Ilustración 8. Probetas en “Horizontal” en Prusa Slicer (izq.) y resultado final (dcha.)**



**Ilustración 9.** Probetas en “Vertical\_X,Y-axis” en Prusa Slicer (izq.) y resultado final (dcha.)



**Ilustración 10.** Probetas en “Vertical\_Z-axis” en Prusa Slicer (izq.) y resultado final (dcha.)

Una vez tenemos fabricadas las probetas, utilizaremos el equipo multifunción H5KS para realizar los ensayos a tracción. Seguiremos el mismo método de ensayo llevado a cabo por Tessa Jane Gordelier y Philipp Rudolf Thies [11]. La distancia que queda libre de la probeta entre mordaza y mordaza es de 64 mm (esta será la longitud inicial para calcular el alargamiento).

Realizados los ensayos obtendremos una gráfica esfuerzo – deformación, de donde hallaremos las siguientes propiedades de interés:

- Límite Elástico (MPa)
- Módulo Elástico (GPa)
- Deformación en límite elástico (%)



**Ilustración 11. Probeta preparada para ensayo a tracción**

### **3.3. COMPORTAMIENTO A TORSIÓN DE TUBOS HUECOS DE PEQUEÑO ESPESOR**

Se utilizarán como parámetros de impresión los mismos recomendados por el fabricante para los ensayos a tracción según norma ISO 527-1:2012 [12] y descritos anteriormente:

- Altura de capa: 0,2 mm
- Relleno: 100%
- Patrón de relleno: rectilíneo
- Capas sólidas (base inferior y superior): 0
- Resto de parámetros: por defecto según impresión “RÁPIDA” y Filamento “Prusa PLA”
- Diámetro de boquilla: 0,4 mm

Las probetas serán impresas siguiendo el esquema “Vertical\_Z-axis”, siendo el principal motivo de esta elección la obtención del mejor acabado superficial ya que no necesitaremos soportes para obtener una pieza cilíndrica perfecta.

### 3.3.1. Ensayo a torsión en equipo WP130

En la siguiente ilustración podemos ver cómo quedaría la probeta para ensayo a torsión en el equipo:

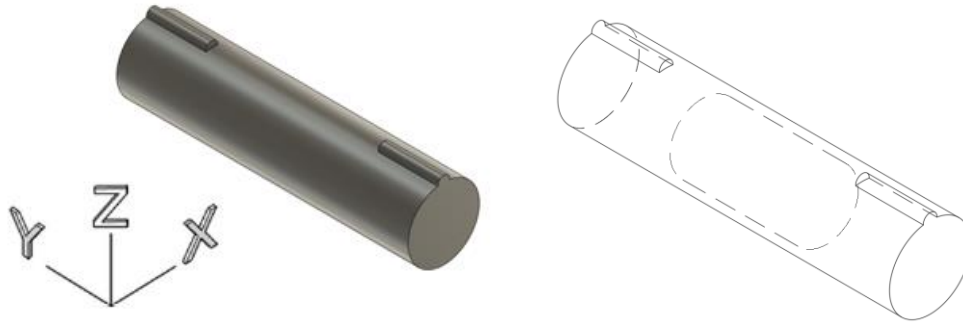


Ilustración 12. Vista 3D y alámbrica de la probeta hueca para ensayo a torsión en equipo manual

Se imprimirán probetas con espesor de pared en la zona hueca de 1, 2 y 3 mm. También se imprimirán probetas completamente macizas. En total se ensayarán 20 probetas para obtener la rigidez (Nm/°) en función del espesor de pared. Con los resultados veremos cómo se comporta la pieza cuando es completamente maciza, frente a probetas huecas con espesor variable de pared.

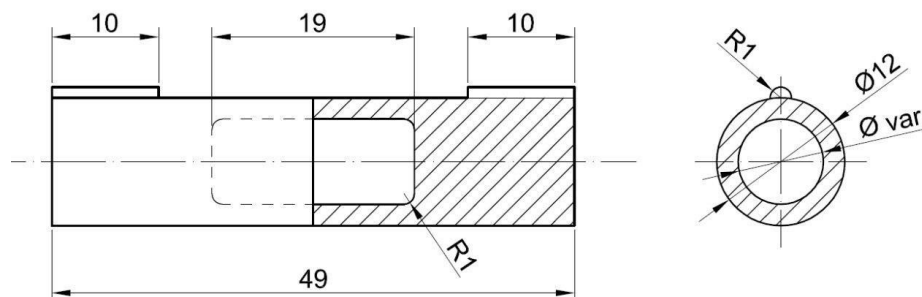


Ilustración 13. Vista de alzado y perfil de probeta hueca para ensayo a torsión en equipo manual

Como se puede observar, la probeta va rellena de material en 15 mm en cada extremo ya que es la zona de agarre de las mordazas. Además, lleva un peralte de 1 mm de radio para hacer de tope entre mordaza y mordaza con el objetivo de evitar movimiento relativo entre la pieza y las mordazas. El relleno en los extremos nos ayudará a evitar deformaciones a la hora de fijar las mordazas.



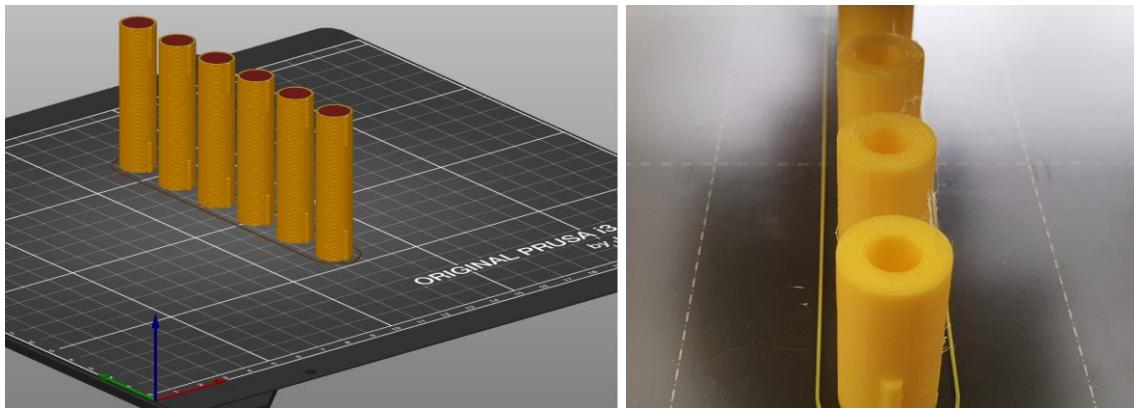


Ilustración 14. Probetas en "Vertical\_Z-axis" en Prusa Slicer (izq.) y resultado intermedio (dcha.)

El ensayo consistirá en realizar 3 ciclos de carga y descarga con intervalos de 10 segundos entre adición o eliminación de carga. Utilizaremos los equipos siguientes:

- El cronómetro CASIO para medir el tiempo.
- El reloj comparador digital DIGICO 11 para medir el desplazamiento vertical.
- Utilizaremos cargas de 1N, 1,47N, 2N y 8N.
- Equipo de torsión WP130

En este ensayo analizaremos la rigidez ( $\text{Nm}/^\circ$ ) de cada probeta y veremos si colapsa o no para la carga máxima de 24,47 N.



Ilustración 15. Equipo de ensayo WP130 preparado (izq.) y detalle de mordaza y probeta (dcha.)

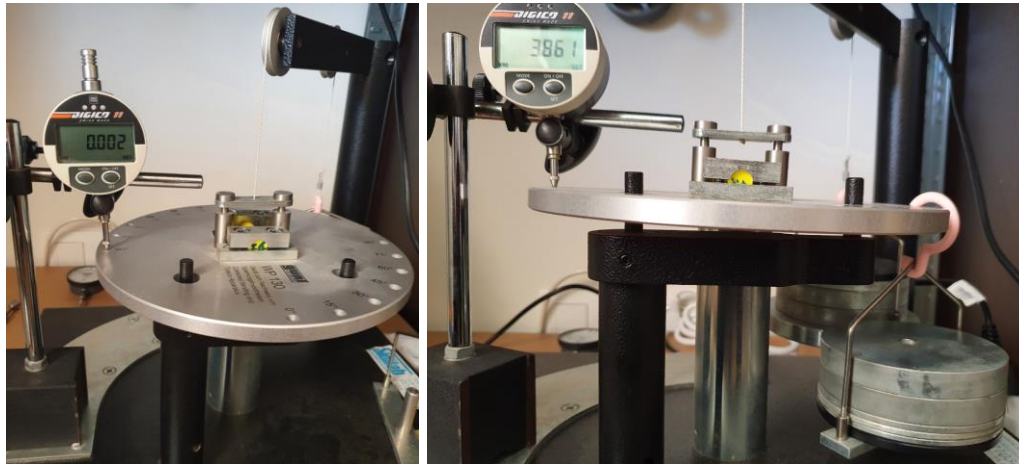


Ilustración 16. Equipo de ensayo WP130 con probeta maciza sin carga (izq.) y carga máxima (dcha.)

En la siguiente tabla podemos ver el esquema que se ha seguido para la adición de cargas, el peso total en cada momento, así como el par ejercido sobre la probeta.

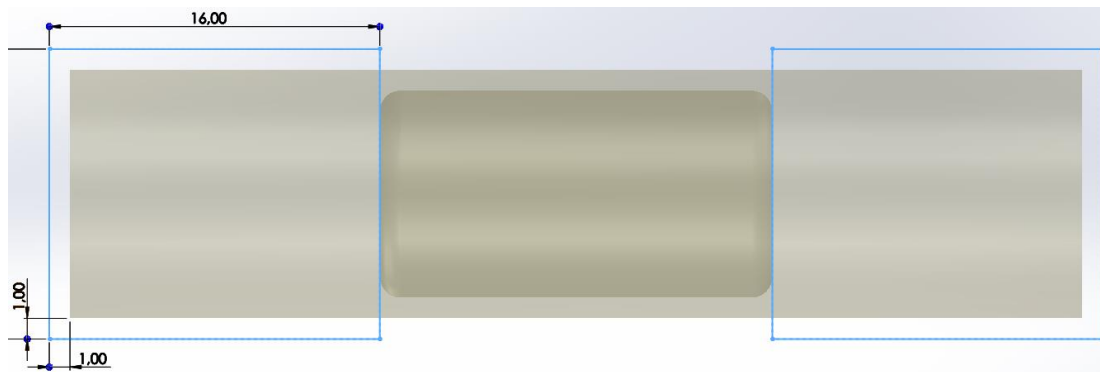
Orden de adición	Pesa (N)	Peso total (N)	Par torsor (N*m)
1º	0,00	0,00	0,000
2º	1,47	1,47	0,147
3º	1,00	2,47	0,247
4º	2,00	4,47	0,447
5º	2,00	6,47	0,647
6º	2,00	8,47	0,847
7º	8,00	16,47	1,647
8º	8,00	24,47	2,447

Tabla 3. Secuencia de carga para el ensayo a torsión

### 3.3.2. Simulación a torsión mediante análisis FEM

Para el análisis FEM no necesitamos que la probeta tenga el peralte de 1 mm de radio para evitar movimiento relativo entre mordaza y probeta, por lo que realizaremos una pieza cilíndrica perfecta con diferente espesor de pared.

Dividiremos la pieza en tres secciones para el análisis estático con el objetivo de poder delimitar correctamente la zona de actuación de las áreas de fijación y las áreas de carga en el sólido mallado.



**Ilustración 17.** Vista 3D translúcida de probeta 1 mm de grosor con líneas divisorias

Como se puede observar, la división de la pieza en los extremos es en dos cilindros de 15 mm de altura (coincidiendo con la zona de agarre de las mordazas). El resultado de las divisiones nos permite delimitar en qué puntos del sólido mallado actúan las cargas o fijaciones.



**Ilustración 18.** Condiciones de contorno en el sólido mallado

Consideraremos un extremo fijo (extremo izquierdo, mordaza eje fijo) y el otro extremo libre, donde sufrirá el par torsor (extremo derecho, mordaza eje móvil).

Las propiedades del material a simular no aparecen en la biblioteca que ofrece el programa. A pesar de ello no lo necesitamos ya que vamos a caracterizar el material y con la información obtenida introduciremos los parámetros a mano. Consideraremos que se trata de un material isotrópico para poder efectuar las simulaciones, ya que estaremos dentro del régimen elástico y ayudará a simplificar la simulación y los resultados serán válidos para los objetivos del trabajo.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

En primer lugar, veremos los resultados de los ensayos a tracción que nos permitirán caracterizar nuestro material y comparar con la ficha técnica del fabricante.

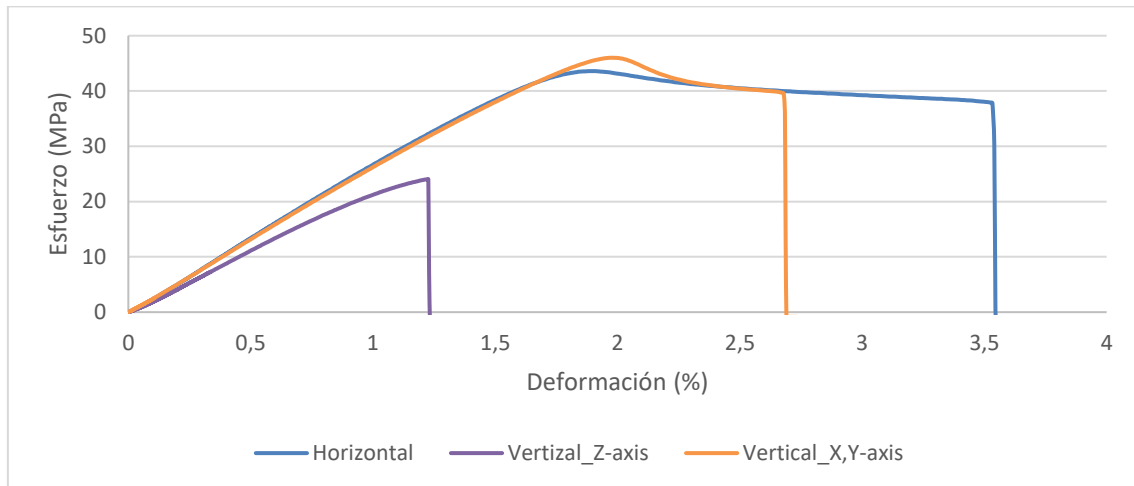


Ilustración 19. Curvas Esfuerzo – Deformación para cada configuración

A primera vista se aprecia que la configuración “Vertical\_Z-axis” tiene un comportamiento frágil ya que se produce la fractura sin que apenas exista fluencia del material.

En las configuraciones “Horizontal” y “Vertical\_X,Y-axis” el comportamiento es dúctil, obteniendo mayor esfuerzo último en la configuración “Vertical\_X,Y-axis” y menor deformación última de rotura frente a la configuración “Horizontal”.

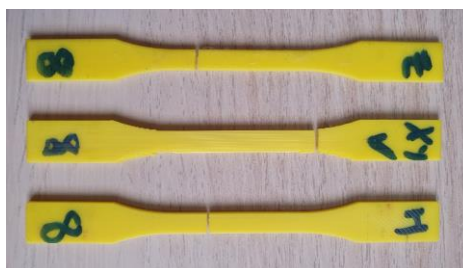
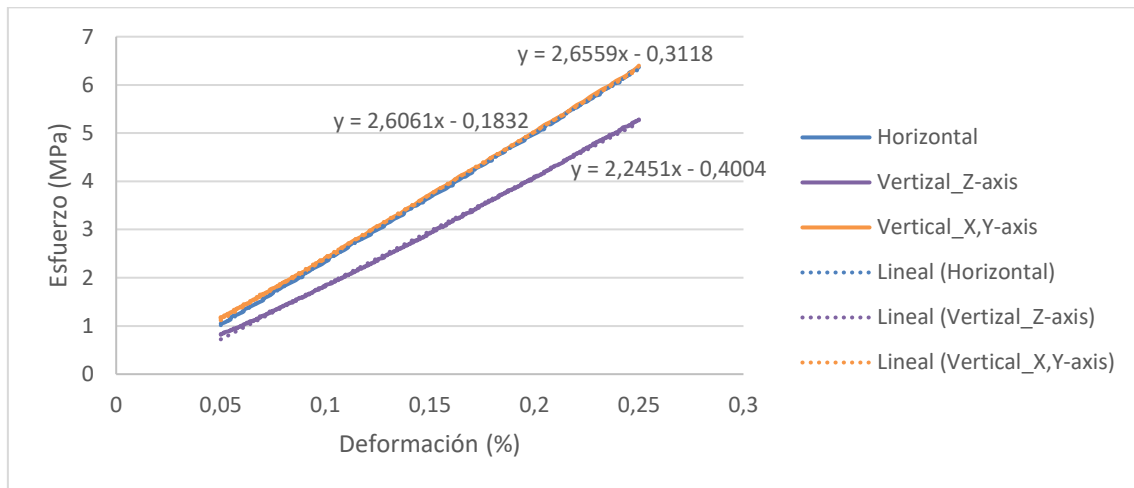


Ilustración 20. Fracturas probeta 8 de “Vertical\_Z-axis”, “Vertical\_X,Y-axis” y “Horizontal”



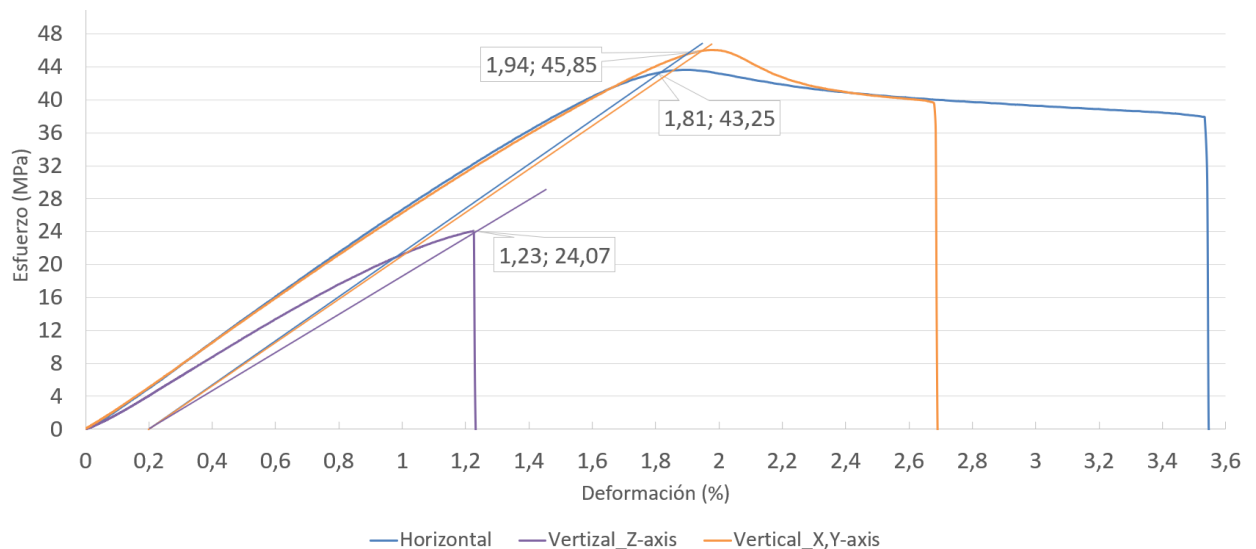


**Ilustración 21. Media de curvas Esfuerzo – Deformación en región elástica para cada configuración**

Si nos fijamos en la región elástica al 0,2% de deformación, realizamos un ajuste lineal para determinar la pendiente de la curva y, por tanto, el módulo de Young. Este módulo nos quedaría para cada configuración así:

- Horizontal:  $E_{Horizontal} = 2,6559 \text{ GPa}$
- Vertical\_X,Y-axis:  $E_{Vertical\_X,Y-axis} = 2,6061 \text{ GPa}$
- Vertical\_Z-axis:  $E_{Vertical\_Z-axis} = 2,2451 \text{ GPa}$

A continuación, trazamos una paralela a la recta de la región elástica y la situamos en el 0,2% de deformación para obtener el límite elástico:



**Ilustración 22. Curvas Esfuerzo – Deformación para cada configuración. Límites Elásticos**

De la gráfica anterior, podemos extraer la media de los Límites Elásticos y su deformación para cada configuración, siendo ésta:

- Horizontal:
  - *Límite Elástico* = 43,25 MPa
  - *Deformación en Límite Elástico* = 1,81 %
- Vertical\_X,Y-axis:
  - *Límite Elástico* = 45,85 MPa
  - *Deformación en Límite Elástico* = 1,94 %
- Vertical\_Z-axis:
  - *Límite Elástico* = 24,07 MPa
  - *Deformación en Límite Elástico* = 1,23 %

Los resultados obtenidos difieren en gran medida de los valores teóricos:

Propiedades / Dirección de impresión	Horizontal	Vertical X,Y-Axis	Vertical Z-Axis	Método
Módulo de Young [GPa]	2,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	ISO 527-1
Límite elástico [MPa]	50,8 ± 2,4	59,3 ± 1,9	37,6 ± 4,0	ISO 527-1
Deformación en límite elástico [%]	2,9 ± 0,3	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3	ISO 527-1
Resistencia a impacto Charpy <sup>(3)</sup> [kJ/m <sup>2</sup> ]	12,7 ± 0,7	13,7 ± 0,7	5,0 ± 1,4	ISO 179-1

Tabla 4. Propiedades mecánicas de probetas impresas en 3D según ficha técnica <sup>(4)</sup>

Esto puede ser debido a varias causas, entre las que cabe destacar:

- Diferente versión del software laminador frente al utilizado en los ensayos del fabricante (se ha utilizado una versión más reciente).
- Condiciones de humedad y temperatura no controladas al no disponer de medios para ello.
- La ficha técnica no hace referencia al color amarillo que hemos utilizado, hace referencia al material (PLA). Como pudo comprobar M. Berzal et al [9] en sus ensayos a tracción de filamentos de PLA de varios colores, obtuvo resultados muy diferentes dependiendo del color, pudiendo ser debido a los pigmentos y aditivos empleados para que el material adquiriera dicho color, afectando significativamente a las propiedades mecánicas del filamento.

- Unido a lo anterior, los datos ofrecidos por el fabricante disponen de una nota informativa, la cual indica que los datos ofrecidos son simplemente para nuestra información y comparación. Los valores son significativamente dependientes de la configuración de impresión, experiencia del operario y condiciones ambientales. Prusa no se hace responsable de cualquier responsabilidad debida a daños o pérdidas causadas por usar sus materiales teniendo en consideración para el diseño sus datos ofrecidos en la ficha técnica.

Las probetas se van a fabricar utilizando la configuración “Vertical\_Z-axis”, por lo que consideraremos estos resultados para el análisis FEM.

$$G_{\text{Vertical\_Z-axis}} = \frac{E_{\text{Vertical\_Z-axis}}}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{2,2451 \cdot 10^9}{2 \cdot (1 + 0,384)} = 811,1 \text{ MPa}$$

#### 4.2. ENSAYO A TORSIÓN

En cada gráfico vamos a ver la media de los resultados de las cinco probetas que tienen menor desviación típica. Veremos en cada gráfico “CARGA 1”, la cual será el inicio de nuestro ensayo y siempre partirá de cero. El resto de cargas serán “CARGA 2” y “CARGA 3”, las cuales no parten desde origen. Entre las posibles causas, destaca:

- Posible movimiento relativo entre las mordazas y la probeta después del primer ciclo de carga
- Ajuste de las distintas partes mecánicas que conforman el equipo después de la primera carga
- “Creep” o fluencia del material ante pequeñas cargas dentro del régimen elástico. Esto es característico en materiales poliméricos. Este efecto es discutido por Enea Sacco [8] ante cargas cíclicas.
- El propio peso del platillo de ensayo hace que no vuelva a su posición inicial una vez quitada la carga.

A pesar de lo anterior, lo más importante de los ensayos obtenidos es la pendiente de la curva, la cual nos va a indicar la rigidez de nuestra probeta. Como veremos en los gráficos, apenas hay diferencia entre la pendiente de la primera carga y el resto de cargas.

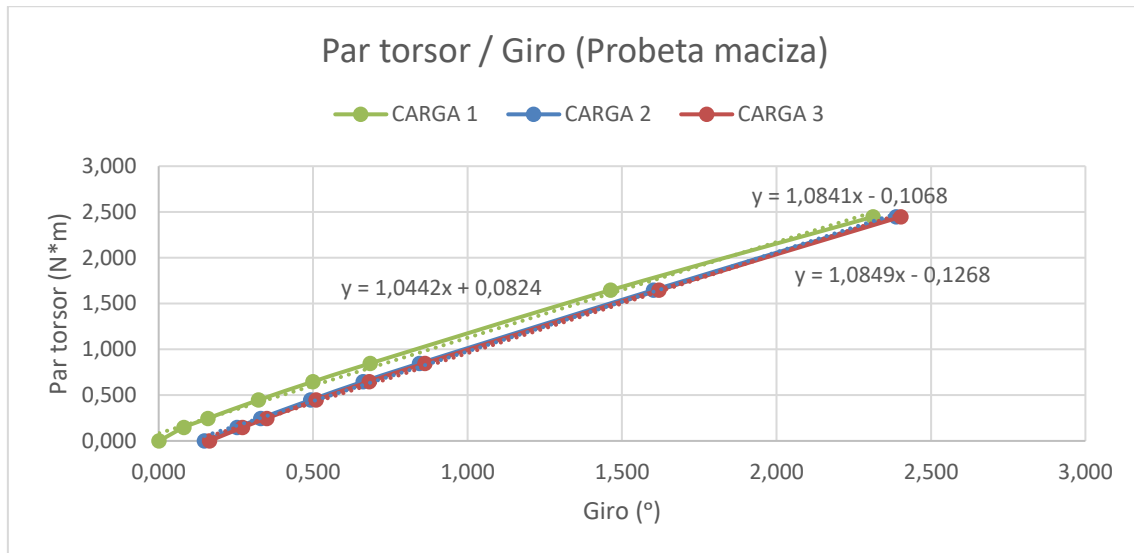


Ilustración 23. Curvas Par torsor / Giro. Probeta maciza

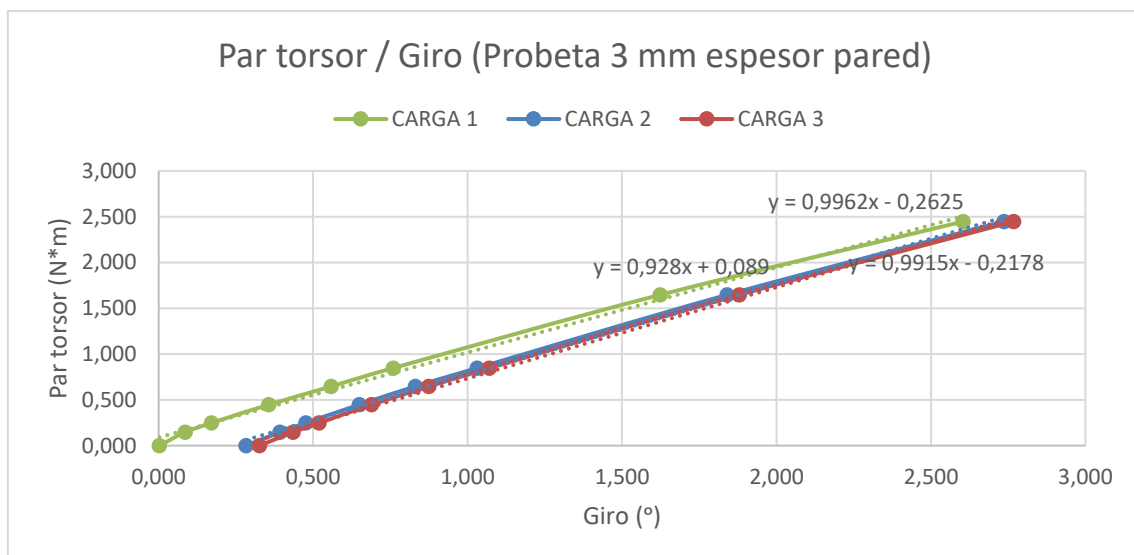


Ilustración 24. Curvas Par torsor / Giro. Probeta 3 mm espesor pared

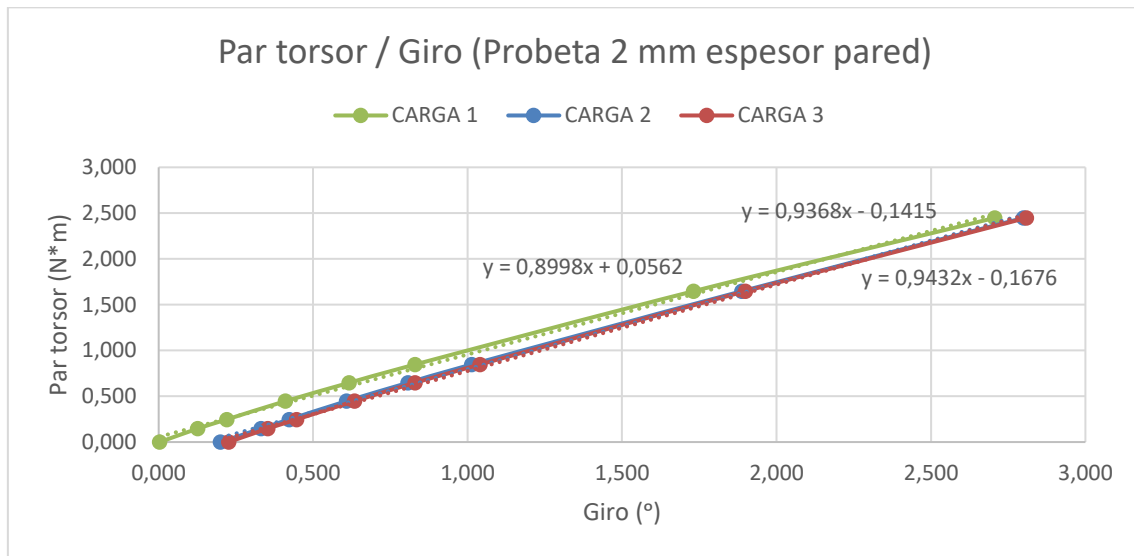


Ilustración 25. Curvas Par torsor / Giro. Probeta 2 mm espesor pared

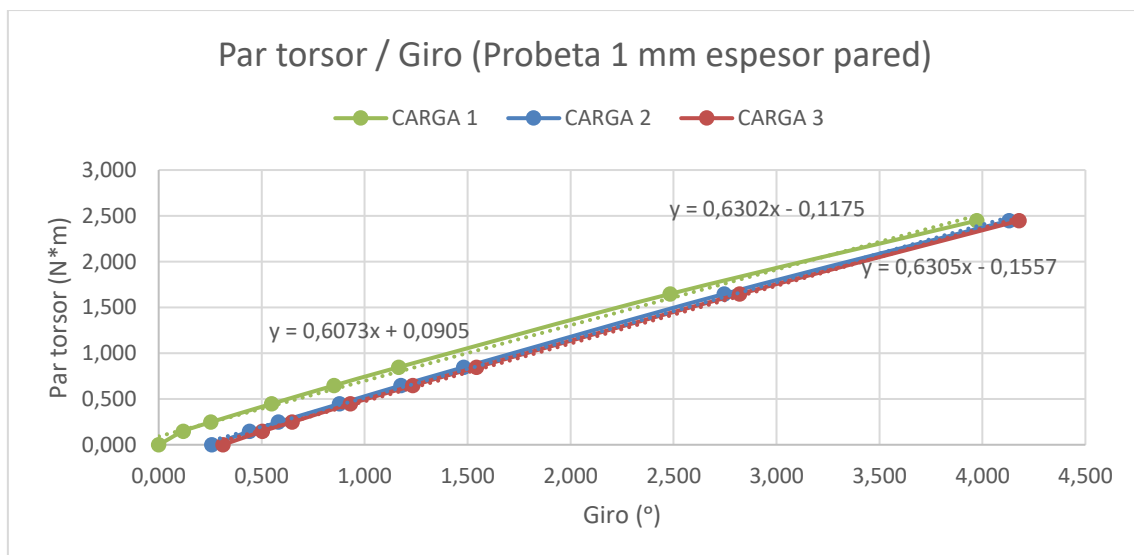


Ilustración 26. Curvas Par torsor / Giro. Probeta 1 mm espesor pared

Como vemos en las gráficas anteriores, la rigidez apenas se ve afectada cuando la probeta tiene 3 mm de espesor de pared si la comparamos con la probeta maciza, mientras que a partir de 2 mm de espesor de pared cae significativamente, obteniendo comportamientos muy similares a los que obtuvo Enea Sacco [8] en su análisis de rigidez de espiras huecas de diferente espesor de pared.

#### 4.3. ANÁLISIS FEM

Con los datos obtenidos durante la caracterización del material, y sabiendo que las probetas se han impreso según orientación “Vertical\_Z-axis”, introduciremos los datos en el apartado material en nuestro ensayo estático:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2245100000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.384	N/D
Módulo cortante	811100000	N/m <sup>2</sup>
Densidad de masa	1240	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	24070000	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión		N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	24070000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.2256	W/(m·K)

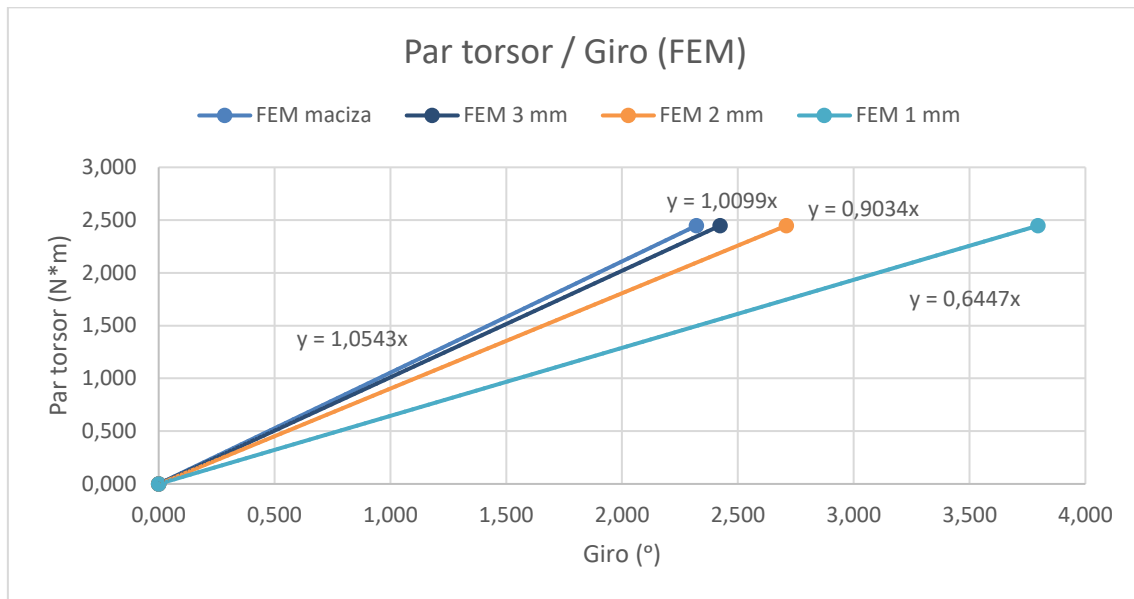
Tabla 5. Tabla de propiedades físicas del material para el ensayo estático

Con esta información, conocemos el par torsor que se aplica en cada momento, por lo que obtendremos el valor máximo de desplazamiento en la pieza para el momento torsor máximo aplicado, quedando una distribución lineal en el resto de momentos torsores aplicados.

Probeta	Par torsor máximo (Nm)	Def. vertical(mm)	Ángulo girado (°)
Maciza	2,4472	0,2432	2,3211
3 mm grosor pared	2,4472	0,2539	2,4231
2 mm grosor pared	2,4472	0,2839	2,7090
1 mm grosor pared	2,4472	0,3981	3,7960

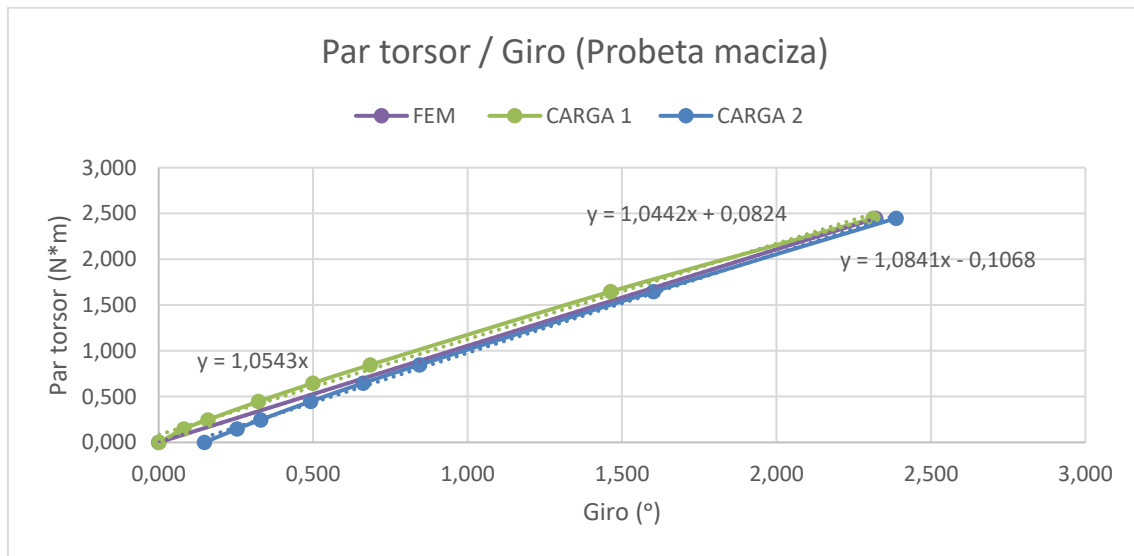
Tabla 6. Simulación ángulo girado en cada probeta para el momento torsor máximo

Podemos representar gráficamente la rigidez de cada modelo FEM:



**Ilustración 27. Rectas Par torsor / Giro. Simulación FEM.**

Cada simulación, comparado con el resultado experimental, tenemos:



**Ilustración 28. Curvas Par torsor / Giro. Probeta maciza (FEM y experimental)**

Tenemos una rigidez de 1,05 (Nm/°) para la simulación FEM, frente a 1,04 (Nm/°) de la primera carga y 1,08 (Nm/°) de la segunda carga experimental.

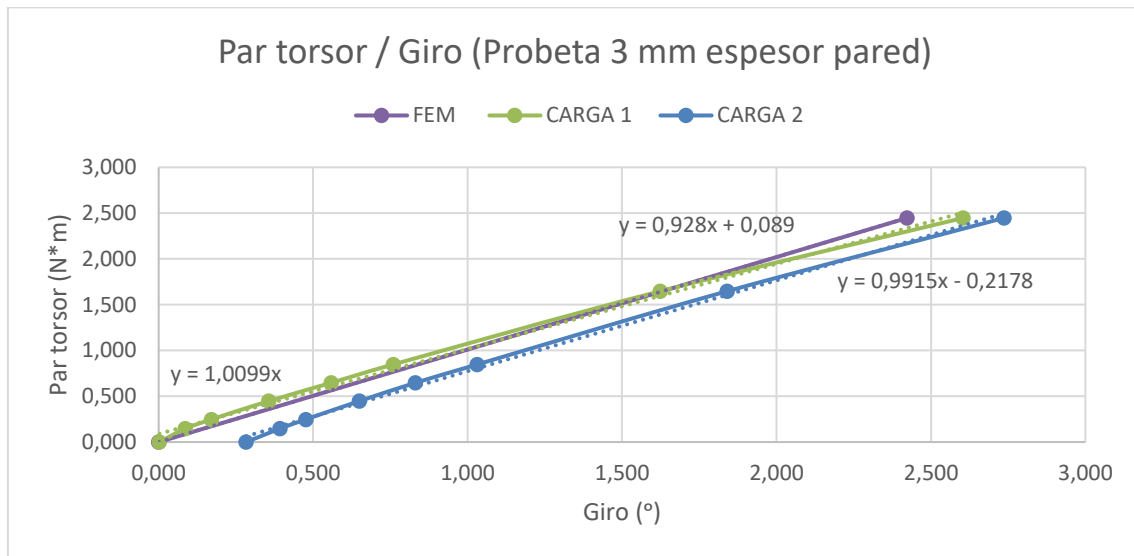


Ilustración 29. Curvas Par torsor / Giro. Probeta 3 mm grosor de pared (FEM y experimental)

Tenemos una rigidez de 1,01 (Nm/°) para la simulación FEM, frente a 0,93 (Nm/°) de la primera carga y 0,99 (Nm/°) de la segunda carga experimental.

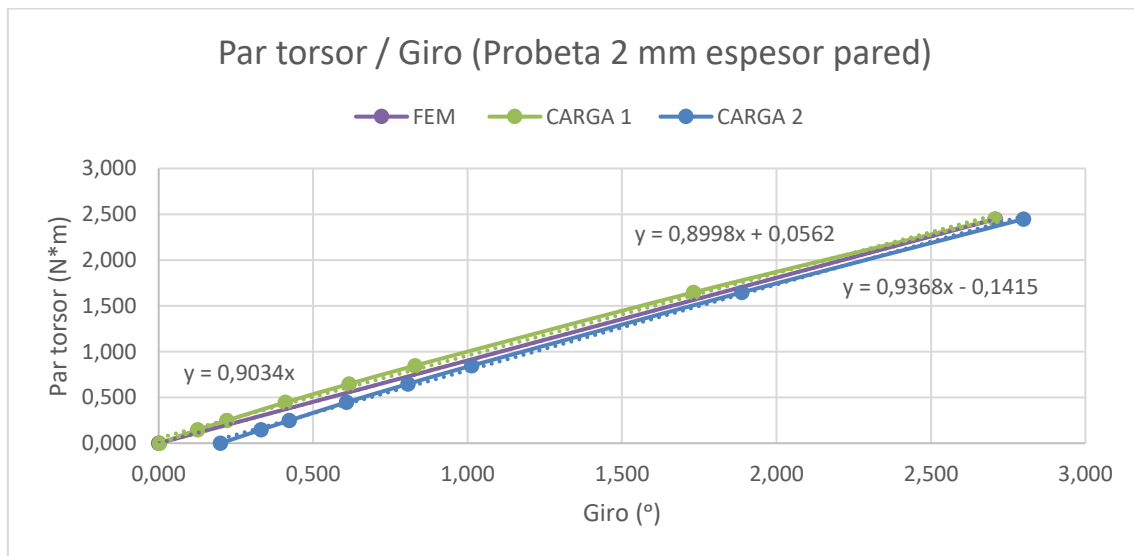


Ilustración 30. Curvas Par torsor / Giro. Probeta 2 mm grosor de pared (FEM y experimental)

Tenemos una rigidez de 0,90 (Nm/°) para la simulación FEM, frente a 0,90 (Nm/°) de la primera carga y 0,94 (Nm/°) de la segunda carga experimental.



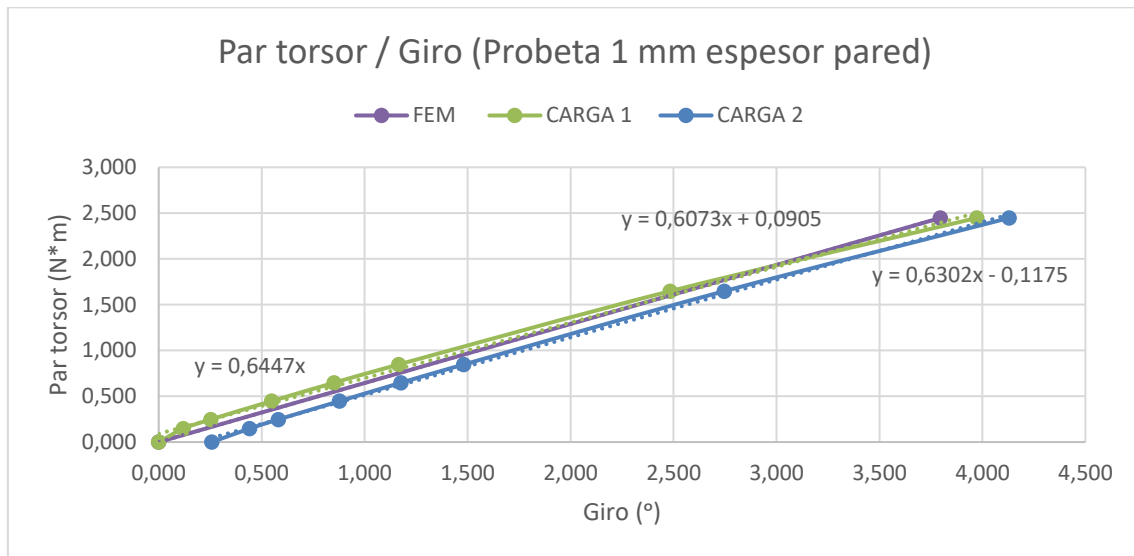


Ilustración 31. Curvas Par torsor / Giro. Probeta 1 mm grosor de pared (FEM y experimental)

Tenemos una rigidez de 0,64 (Nm/°) para la simulación FEM, frente a 0,61 (Nm/°) de la primera carga y 0,63 (Nm/°) de la segunda carga experimental.

Probeta	Rigidez FEM	Rigidez CARGA 1	Rigidez Carga 2
Maciza	1,0543x	1,0442x + 0,0824	1,0841x + 0,1068
3 mm grosor pared	1,0099x	0,928x + 0,089	0,9915x - 0,2178
2 mm grosor pared	0,9034x	0,8998x + 0,0562	0,9368x - 0,1415
1 mm grosor pared	0,6447x	0,6073x + 0,0905	0,6302x - 0,1175

Tabla 7. Resumen y comparativa rigidez FEM y ensayos según tipo de probeta

Vemos en general un resultado muy aproximado al ensayo experimental, siendo más ajustada la rigidez a partir del segundo ciclo de carga (se ha obviado poner el ciclo tercero de carga ya que es muy similar al segundo ciclo).

Este resultado está conforme con los resultados obtenidos por Balderrama et al. [7], donde observamos que en la región elástica las piezas fabricadas mediante modelado por deposición fundida pueden considerarse isotrópicas si van a trabajar en la región elástica.

M. Berzal et al. [9] consigue también unas aproximaciones muy buenas en el análisis FEM con respecto al ensayo experimental en la región elástica. En sus estudios diseña probetas con un relleno del 40%, quedando el 60% hueco

entre trazo y trazo del patrón de relleno rectilíneo. En nuestro estudio, tenemos todo el centro de la probeta hueca, sin relleno.

En la configuración “Vertical\_Z-axis” el material presenta comportamiento frágil y peores propiedades mecánicas, sin embargo la geométrica y acabado superficial de la pieza obtenida, unido a la similitud del comportamiento a torsión obtenido mediante análisis FEM, nos permitirá realizar el diseño de tubos redondos huecos para ser sometidos a torsión donde sea requisito indispensable un buen acabado superficial sin necesidad de postprocesado, pudiendo utilizar un equipo de impresión 3D de tipo FDM y elegir el material más adecuado para la función que desempeñará.

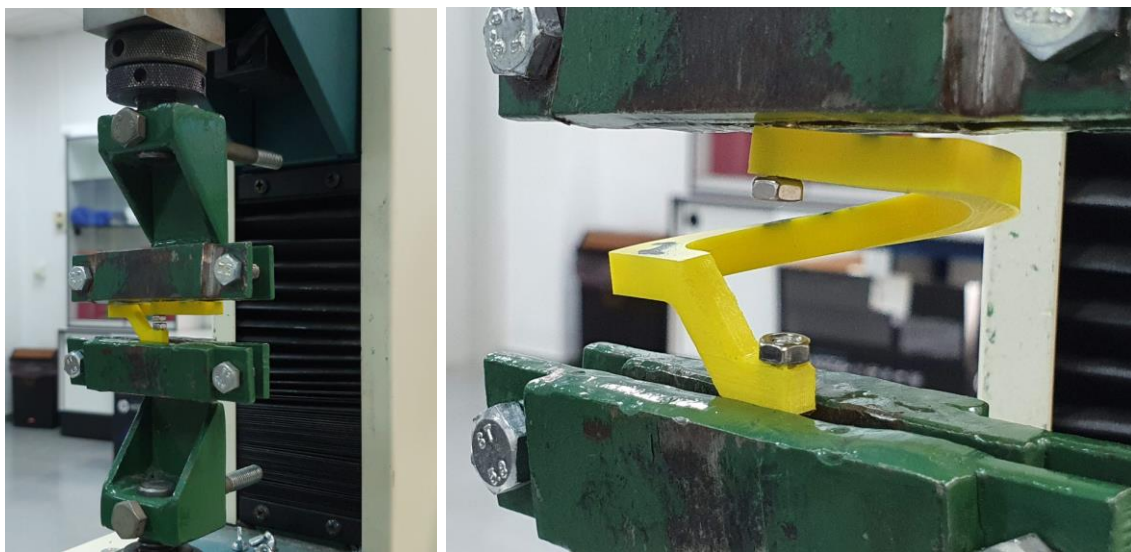
#### **4.4. LIMITACIONES DEL TRABAJO**

No se ha podido hacer un estudio más extenso debido a la rotura del equipo multifunción H5KS. Además de ello, nos hemos encontrado con algunos obstáculos, entre los que cabe destacar:

- Impresión con altura de capa 0,05 mm. De acuerdo a la literatura existente [6] [8], la fabricación aditiva de tipo FDM difiere en gran medida de la tradicional en cuanto a compactación del material, por lo que a menor altura de capa conseguiremos una mejor compactación, y, por tanto, nos aproximaremos más a las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante procesos de fabricación tradicionales como puede ser inyección.

Se ha intentado fabricar probetas de altura de capa 0,05 con la misma configuración de fábrica (boquilla de 0,4 mm de diámetro). No obstante, se producían atascos debido a la retracción constante del filamento y la lentitud a la hora de salir de la boquilla (Prusa Slicer adecúa el flujo de material según la boquilla instalada). A menor altura de capa, menor flujo de material. Para no cambiar las condiciones entre unas probetas y otras, se decidió mantener la boquilla de 0,4 mm de diámetro para fabricar a 0,2 mm de altura de capa.

- La fabricación de semiespiras huecas de pequeño espesor y diferente sección sometidas a torsión era uno de los objetivos específicos del presente estudio, Enea Sacco [8] nos detalla que hay situaciones en las que es necesario fabricar resortes para algún repuesto y los medios que hay son limitados (por ejemplo en el espacio), en su tesis consigue caracterizar el material y realizar una serie de ensayos hasta lograr una ecuación para diseñar resortes y predecir el comportamiento antes de su fabricación.



**Ilustración 32. Semiespira hueca de sección cuadrada sometida a torsión en la máquina de tracción.**

Se hicieron probetas con diferentes valores de los parámetros a estudio, ya que como Enea Sacco [8] advierte, la rigidez comienza a caer significativamente a partir de 2 mm de diámetro interior (para un diámetro exterior de 5 mm), por lo que resulta un reto optimizar los parámetros de impresión y configuraciones geométricas para conseguir la menor disminución de rigidez en espiras huecas de pequeño espesor de pared con respecto a espiras macizas, consiguiendo además un significativo ahorro de material y tiempo de fabricación. Tuvimos una avería en el equipo de ensayo a tracción que nos obligó a apartar este estudio y posponerlo para trabajos futuros.



**Ilustración 33.** Semiespira de sección cuadrada. Fractura semiespira hueca (arriba) y maciza (abajo)



**Ilustración 34.** Detalle de fractura a 45° en la semiespira hueca de sección cuadrada.

En las imágenes anteriores se puede observar que en la semiespira maciza se produce una deformación plástica acusada, mientras que en la hueca se produce la fractura prácticamente sin apreciar deformación plástica.

## 5. CONCLUSIONES

---

El valor de rigidez para tubos redondos huecos de 3 mm de espesor de pared es prácticamente el mismo que para el caso de la probeta maciza, a partir de 2 mm de espesor de pared comienza a apreciarse una diferencia significativa en la rigidez a torsión. Para la probeta de 3 mm de espesor de pared supone un ahorro de material del 25%, ahorro considerable si apenas se ve afectada la rigidez. Si vamos al caso más extremo vemos que la rigidez disminuye un 58% cuando el tubo hueco tiene 1 mm de espesor de pared, siendo el ahorro de material de un 69%. Si este valor de rigidez cumple con los requisitos de diseño vemos que hay un importante ahorro de material y se debe contemplar en proyectos donde se pretenda optimizar al máximo los recursos disponibles. Se ha alcanzado el objetivo de estudio de la rigidez a torsión de tubos circulares huecos para distintos parámetros de impresión, no siendo así para el objetivo de estudio de resistencia a torsión debido a las limitaciones encontradas durante el desarrollo del estudio.

Además del ahorro de material, tenemos un ahorro tiempo de fabricación considerable, ya que únicamente la máquina de fabricación aditiva tendrá que realizar trayectorias de adición de material para fabricar el perímetro de la probeta, sin importar el patrón de relleno ya que al ser tubos redondos de pequeño espesor no es posible utilizar relleno en la periferia de la pieza con la máquina utilizada en el presente estudio, a diferencia de otras investigaciones donde se utiliza un porcentaje de relleno y un patrón, teniendo por tanto que realizar más trayectorias de adición de material en cada capa.

Los resultados obtenidos en el método experimental y en el método por elementos finitos son muy similares, lo cual indica que el procedimiento seguido permite efectuar diseños de tubos redondos huecos de diferente espesor de pared para aplicaciones en las que la pieza vaya a trabajar a torsión, pudiendo configurar la rigidez deseada sin necesidad de fabricar y testear probetas de forma previa, con el consiguiente ahorro de tiempo y material que supone, siempre que tengamos ya caracterizado el material de forma previa.

## 6. TRABAJOS FUTUROS

---

En el apartado 4.4 se indican las limitaciones y obstáculos que han tenido lugar durante la realización del presente trabajo. Por lo que resultará interesante seguir profundizando en los siguientes temas de interés:

- Estudio del comportamiento a torsión de semiespiras huecas de diferente espesor y sección, realizadas mediante fabricación aditiva tipo FDM con diferentes parámetros de fabricación.
- Estudio de la compactación de material a pequeña altura de capa  $< 0,05$  mm.
- Comparativa con procesos tradicionales de fabricación (moldeo por inyección).
- Uso de diferentes materiales además de PLA, como puede ser ABS, HIPS, GF (Fibra de vidrio), CF (Fibra de carbono), polímeros conductores de electricidad, etc.
- Análisis de la superficie de las probetas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) antes y después de ser ensayadas. Con ello lograríamos ver el grado de compactación del material y qué ocurre antes y después de la rotura a escala microscópica.
- Obtener una ecuación que permita predecir el comportamiento mecánico de las piezas ensayadas conociendo las condiciones de contorno y características físicas del material.



## **BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS**

---

- [1] M. Samykano *et al.* “*Mechanical property of FDM printed ABS: Influence of printing parameters*”, 2019. DOI: 10.1007/s00170-019-03313-0
- [2] M. Domingo-Espín *et al.* “*Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts*”, 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.074
- [3] R. Zou *et al.* “*Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material*”, 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.06.009
- [4] O. S. Es-Said *et al.* “*Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples*”, 2007. DOI: 10.1080/10426910008912976
- [5] C.W. Ziemian *et al.* “*Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage of additive manufactured parts*”, 2016. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.080
- [6] M. Dawoud *et al.* “*Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques*”, 2015. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.11.002
- [7] C. O. Balderrama *et al.* “*Torsion analisis of the anisotropic behaviour of FDM technology*”, 2018. DOI: 10.1007/s00170-018-1602-0
- [8] E. Sacco “*Analysis and modelling of 3D printed springs for use in spacecraft*”, tesis doctoral, Mechanical and Aerospace Engineering Nanyang Technological University Singapore, June 2, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10356/141038> [Accedido: 25-jul-2020]
- [9] M. Berzal *et al.* “*Simple filling patterns to model mechanical behaviour of FDM's test pieces under torsion*”, 2017. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.185
- [10] *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión*, Norma UNE-EN ISO 527-2:2012.

- 
- [11] T. J. Gordelier *et al.* “*Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review*”, 2019. DOI: 10.1108/RPJ-07-2018-0183
  - [12] *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales*, Norma UNE-EN ISO 527-1:2012.
  - [13] L. O. Berrocal, “*Resistencia de Materiales*”, McGraw-Hill/Interamericana de España, 3ª Edición, 2007.
  - [14] Timoshenko, J. M. Gere “*Resistencia de Materiales*”, Ediciones Paraninfo, 5ª Edición, 2019.
  - [15] Biblioteca de la Universidad Pública de Navarra. Oficina de Referencia. “Guía para citar y referenciar. IEEE Style”, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://t.ly/TAsG>.
  - [16] Prusa 3D. Hoja de especificaciones técnicas del filamento de PLA, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA\\_TechSheet\\_SPA.pdf](https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA_TechSheet_SPA.pdf)
  - [17] Prusa 3D. Hoja de especificaciones técnicas de seguridad del filamento PLA, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA\\_Safety\\_Data\\_Sheet\\_SPA.pdf](https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA_Safety_Data_Sheet_SPA.pdf)
  - [18] Tinius Olsen. Hoja de especificaciones técnicas del equipo multifunción H5KS, 2010. [En línea]. Disponible en: [https://www.dropbox.com/s/oeebn7sj9g3ksik/tinius-olsen-h1ks\\_datasheet.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/oeebn7sj9g3ksik/tinius-olsen-h1ks_datasheet.pdf?dl=0)
  - [19] Gunt Hamburg. Hoja de especificaciones técnicas del equipo de ensayo a flexión – torsión WP 130, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://www.gunt.de/images/datasheet/1531/WP-130-Comprobacin-de-hiptesis-de-tensiones-gunt-1531-pdf\\_1\\_es-ES.pdf](https://www.gunt.de/images/datasheet/1531/WP-130-Comprobacin-de-hiptesis-de-tensiones-gunt-1531-pdf_1_es-ES.pdf)
  - [20] Tesa Technology. Hoja de especificaciones técnicas del reloj comparador digital TESA DIGICO 11. [En línea]. Disponible en: <http://www.europacprecision.com/files/products/91/1/E10-12.pdf>
-



- [21] Casio. Hoja de especificaciones técnicas del cronómetro CASIO 2699 HS-3V-1R, 2020. [En línea] Disponible en: <https://www.casio-europe.com/es/productos/relojes/sports/hs-3v-1ret/>
- [22] Prusa 3D. Hoja de especificaciones técnicas de la impresora 3D Prusa i3 MK3s, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.prusa3d.es/original-prusa-i3-mk3-spa/>
- [23] Autodesk. Acceso e información al software de diseño 3D Autodesk Fusion 360, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
- [24] Prusa 3D. Acceso e información al software de laminación Prusa Slicer, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.prusa3d.es/prusaslicer/>
- [25] Dassault Systems. Acceso e información al software de diseño y análisis FEM SolidWorks, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/es/online-product-trials>
- [26] MatWeb Material Property Data. Acceso a información de propiedades físicas y químicas del material PLA, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=PLA>